

승용차 차체의 강도 구조 개선을 위한 융합설계

이정익

인하공업전문대학 기계설계과

The Convergence Design for Stiffness and Structure Advancement of Automotive Body

Jeong-Ick Lee

Department of mechanical design, INHA Technical College

요약 자동차 구조 요소 설계에서 설계 엔지니어에게 주어진 가장 중요한 과업중 하나는 요소의 수명을 결정하고 그 요소가 좌굴하지 않도록 개선하는 것이다. 이렇게 하려면, 설계 엔지니어는 개념 설계 단계에서부터 부분 형상을 만들어 가기 위해 간단한 부분 해석을 먼저 시행해야 한다. 그리고 응력 레벨을 위한 보다 진보된 해석을 사용해야 한다. 이 단계에서 해석은 하중 경로와 총 응력 레벨의 총체적 거동을 이해하는데 집중되어야 한다. 구조의 강성 해석을 위한 최적의 모델은 설계 과정에서 응력 정보의 적절한 레벨을 제공한다. 보다 자세한 응력 해석을 하기 위해서 구조 모델은 응력 집중 또는 힘(또는 변위)분포 같은 자세한 국소 영역들을 가져야 한다. 본 연구는 자동차 차체 구조의 응력해석을 위한 설계 시 고려해야 할 사항들을 제시한 논문이다.

• **주제어** : 융합설계, 강도, 구조, 개선, 수명 해석

Abstract In the design of an automotive structural component, one of the more important tasks for a design engineer is to determine the life of the component and to ensure that the component will not fail prematurely. In order to accomplish this, a design engineer will first use simple section analysis to come up with a section shape in the concept design stage and use more advanced analysis for stress level. At this stage, the analysis should focus on understanding overall behavior in terms of load paths and gross stress levels. A model that is adequate for a stiffness analysis of the structure will usually provide an adequate level of stress information in the design process. To perform a detailed stress analysis, the structure models must have the detailed local areas such as stress concentrations or force(or displacement) distributions. This paper is to present the design considerations for the stress analysis of automotive structure.

• **Key Words** : Convergence design, Stiffness, Structure, Advancement, Life analysis

1. 서론

자동차의 부품 설계에 있어, 부품의 수명을 예측하고 이른 시기에 파손이 되지 않도록 설계하는 것이 중요하다

다. 이를 위하여 개념 설계 단계에서 부품의 형상이나 단면 해석을 수행하고 국부적인 파손 발생 여부에 대한 강도 해석으로써 응력분포를 검토한다. 이와 같이 응력 해석의 결과를 토대로 실제 작용 하중(동적 하중-자동차의

*Corresponding Author : 이정익(jilee@inhac.ac.kr)

Received February 27, 2017

Accepted April 20, 2017

Revised March 20, 2017

Published April 28, 2017

주행 하중)에 대한 피로 해석을 수행하게 된다[1,2,3,4,5].

차체 구조 특성을 검토하는 과정으로써, 전체적인 차체 구조에 대한 기본적인 하중 전달 경로나 국부적인 변형 상태는 굽힘 및 비틀림에 대한 강성 해석과 고유 진동수 해석으로 검토한다. 그리고 구조물의 국부적인 상세 및 전체적인 응력 분포를 검토하기 위하여 주행중 최대 작용 하중에 대하여 응력 해석을 하며, 응력 해석을 위하여 구조물을 유한 요소로써 표현할 때, 요소 크기의 선정이 중요하다[6,7]. 변형률 또는 응력 해석에서 사용되는 유한 요소 모델은 변위 및 하중 해석 또는 고유 진동수 해석에 사용되는 유한 요소에 비하여 변형률이나 응력 분포에서 요소 경계를 따라 불연속을 형성하기 때문에 상세 요소 모델이어야 한다. 그리고 하중과 변형의 급격한 변화를 나타내는 부위에 있어서도 상세 요소 모델링이 요구된다. 응력 해석은, 일반적으로 선형 탄성 해석으로 통하여 이루어지나 평가 기준에 따라 극한 하중(limit load)하에서 어느 정도의 영구 변형이 내재된 설계에 있어서는 비선형 해석이 요구된다[8,9,10]. 그리고 구조물의 응력 분포에 있어서 급격한 변화는 완만한 변화에 비하여 구조물의 거동 변형에서 임계 영역을 나타낸다.

차량에 작용되는 하중은 주행시 현가계의 거동(vertical jounce and rebound, lateral load due to turning, and forward/rearward braking loads)에 의하여 하중이 마운팅 부위에 통하여 전달되는 하중이다. 그러므로 차체의 강도 해석에 필요한 유한 요소 모델에는 이러한 마운팅 결합 형태를 어느 정도 반영된 모델로 구성하여야 한다. 본 논문은 차체의 강도 해석에 있어서 필요한 유한 요소 모델링과 설계 세목에 대하여 설명하고자 한다[11,12,13].

2. 차체의 강도설계

차체 구조는 일반적으로 주요 강도 부재(강도상 차량의 안전 운행을 위하여 필요한 부재)로써 얇은 패널로 이루어진 적층 구조(laminate structure)에 의하여 보강된 내 및 외각 구조로 되어있다. 외각 구조는 표면 응력을 분담하고 내 및 외판에 의한 폐단면의 부재는 축력 및 굽힘에 대한 하중을 분담하여 구조 전체로서 강성 및 강도를 확보하는 것을 목적으로 하고 있다. 그러나 차체 구조에서 도어부, 프론트 및 리어 글래스부등과 같은 개구부 비율이 커서 설계상 강도 및 강성측면에서 불리하다. 비

틀림 거동에 있어서 개단면 부재에는 강성 및 강도 측면에서 저하가 현저하게 나타난다. 그러므로 차체의 구조를 유지하기 위하여 구성 부재중 강성 유형에 따른 폐단면 부재와 패널에 대한 기여도를 검토하여야 하며, 이를 바탕으로 적합한 강도를 가지도록 국부적인 부재의 변경이 필요하다. 개구부를 보강하기 위하여 부재에 대한 부가적인 패널 보강과 형상 보강을 유기적으로 외각 구조 및 다른 부재에 어떻게 유용하게 결합하느냐에 달려있다.

차체에 대한 부재에 대한 보강은 차체에 작용하는 하중이 어떠한 경로로 전체적으로 또는 국부적으로 전달되는지를 파악하고 외각 구조의 각 부위별 강성 기여도에 따라 결합 형상 및 방법까지도 고려하면서 균형있게 설계할 필요가 있다. 부위별로 일부에 극단적으로 강성이 높은 부분이 있으면 하중의 분담이 국부적으로 되고 구조 전체 강성은 약하게 될 수 있다. 차체의 부하는 차체 전체에 작용하는 전체 부하, 부재에 국부적으로 작용하는 부분 부하로 대별할 수 있다. 또한, 부하 하중은 정적인 부하와 동적인 부하로 구분할 수 있다. 그러나 차체의 부하 대부분이 동적 부하이므로, 다양한 운전 조건, 도로 조건, 적재 조건등에 대응할 수 있도록 부하를 선정하여야 하므로 충분히 주의할 필요가 있다. 단, 충돌 하중과 같이 소성 변형과 피로 파괴를 고려할 필요가 없는 동적 하중에 대해서는 정적 하중으로 변환시켜 해석할 수가 있다 [14,15,16].

강도 측면에서 응력 해석을 수행할 때, 일반적으로 선형 정적 해석으로 통하여 이루어지지만 평가 기준에 따라 극한 하중하에서 어느 정도 영구 변형이 내재된 설계에 있어서 비선형 정적 해석-대변형과 관련된 기하학적인 비선형, 재료 비선형성, 접촉 및 마찰과 관련된 경계 비선형성-이 요구된다. 강도 해석과 관련하여 구조물의 내구성은 다음과 같은 절차로 수행된다.

- Step 1 부가 하중 형태에 대한 정의
- Step 2 동적 하중에 대한 응력 및 변형률 정의
- Step 3 피로 수명에 대한 관계정의

차체의 내구성과 관련하여 피로로 인한 균열은 보통 패널의 자유 표면에서부터 시작되기 때문에 필요한 응력은 표면 응력이다. 블록 요소(solid element)를 사용한 해석인 경우, 절점에서 응력값이 중요하고 쉘 요소를 사용한 경우, 요소의 중심에서 top/bottom 표면 응력을 사용

한다. 쉘 요소를 가지고 신뢰성있는 응력 해석이 가능한 구조물의 경우, 용접을 포함한 구조물의 용접부분 선단(weld toe)에서 정확한 응력을 구하려고 노력하는 것은 현실적이지 못하며 용접부분에 근접한 요소에 대한 신뢰성있는 응력을 구하는 것으로 충분하다.

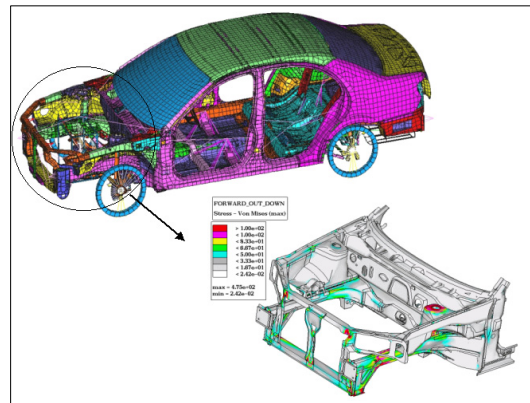
진동 측면에서 고려할 사항으로써, 하중에 대한 응답으로써 구조물의 동적 거동 특성에 대한 것이다. 동적 하중 이력의 지배적인 주파수가 구조물의 첫 번째 고유 진동수보다도 훨씬 낮을 경우, 구조물의 동적 효과에 따른 거동은 무시할 수 있고 준 정적(quasi-static) 또는 정적 해석으로 대신할 수 있다. 자동차의 대부분 샤시 및 서스펜션 부품들이 일반 도로 주행시 받는 하중 상태가 바로 이러한 예이다. 그러나 하중 이력이 구조물의 진동 특성과 비슷하게 되는 경우, 동적 특성을 고려해서 해석을 하여야 하며 이것을 판단하는 간단한 방법은 입력 하중 이력에 대한 PSD(Power Spectral Density)를 구해서 부품이나 시스템의 주파수 특성과 비교하는 것이다.

강도 해석을 통한 응력 분포의 검토는 외적 및 내적 부하에 따라 부위별 또는 부재내에서 발생하는 응력과 관계가 정량적인 분포가 얻어지면 실제 거동에 따른 파손 사고 등이 발생하는 경우 재강도 설계에 중요한 설계 방향을 제시해 준다.

자동차를 실제로 주행시켜 단지 부서질 것인가를 확인하는 것이라면 방대한 피로에 관한 연구는 불필요한 것이 될 것이다. 얼마나 오래 견디고 어떠한 부하에서 어떠한 변형될 것인가 등 정량적 평가를 내리고 설계분야에 피드백하는 것을 포함하여 종합적으로 안전성을 높이기 위하여 피로 해석이 요구된다.

3. 차체의 강도해석

차체의 내구 해석을 위한 해석 모델은 현가계가 장착된 full vehicle model이며, 차체 구조물은 정의된 수 개의 구조 부재로 구성되는 하중 경로에 따른 하중 분포에 주목하며, 하중 조건에 대한 각 하중의 영향은 기구학적인 거동을 하는 부계에서 유효한 지를 유의하여 검토하여야 한다. 이에 대한 개략적인 모델이 Figure 1에 나타나있다. 차체의 강도해석 모델은 강성모델을 기반으로 하여 20 mm 이하 요소 크기로 가능한 원래의 형상을 그대로 모델링에 포함하는 것이 바람직하다. NVH 해석에 사용되는 B.I.W. 모델(40 ~ 50 mm)을 사용하는 경우엔



[Fig. 1] Strength analysis of full vehicle model

는 국부적인 부위에 대해서는 20 mm이하로 요소 크기를 하여야 한다. 패널 구조에 있어서 해석에 가장 큰 영향을 끼치는 요인은 각 패널사이의 용접이다. B.I.W.의 용접을 표현하는 방법은 절점 공유(node coincident), 강체 요소(rigid element), 매우 stiff한 빔 요소 등이 사용되는데, 강체 요소를 사용하는 것이 가장 바람직하다. 결합부 위 등과 같이 용접이 복잡한 부위나, 여러 개의 패널이 용접되는 곳은 용접점의 개수보다는 용접강도를 고려하여 모델링을 해야 한다. 또한 정확한 응력을 얻기 위해선 bolt, nut, washer, thick plate 등을 모델에 포함시켜야 한다. Trim part들은 집중 질량(lumped mass)을 이용하여 패널 모델에 포함시켜야 한다. 현가계 모델은 빔 요소, 강체 요소, 스프링 요소, 집중 질량 요소 그리고 구조 부재인 경우, 쉘이나 고체 요소로 구성된다. Trim Part들을 모델화할 때, 이들의 질량 및 관성 효과가 표현되도록 하며, B.I.W.에 강성을 저해시키거나, 강체 요소 등으로 인하여 B.I.W.의 강성이 실제보다 증가하지 않도록 유념해야만 한다. Insulation 및 deadner등은 비구조 질량 요소(nonstructural mass element)를 사용하여 패널에 분포시키며, Radiator 및 condenser 등의 마운팅은 스프링 요소(spring element)를 사용하여 모델링한다. 샤시 시스템(chassis system)은 현가계(front suspension, rear suspension), 조향계(steering system), 배기계(exhaust pipe system)등으로 구성되며, 주요 기능은 차축과 차체(B.I.W.)를 연결하여 차체를 지지하며, 주행시 노면으로부터의 진동이나 충격을 차단하는 역할과 주행 및 선회시 차량의 조정 안정성(handling)을 확보하는 데 있다. 샤시 시스템 모델의 링크 시스템(link system)은 빔 요소

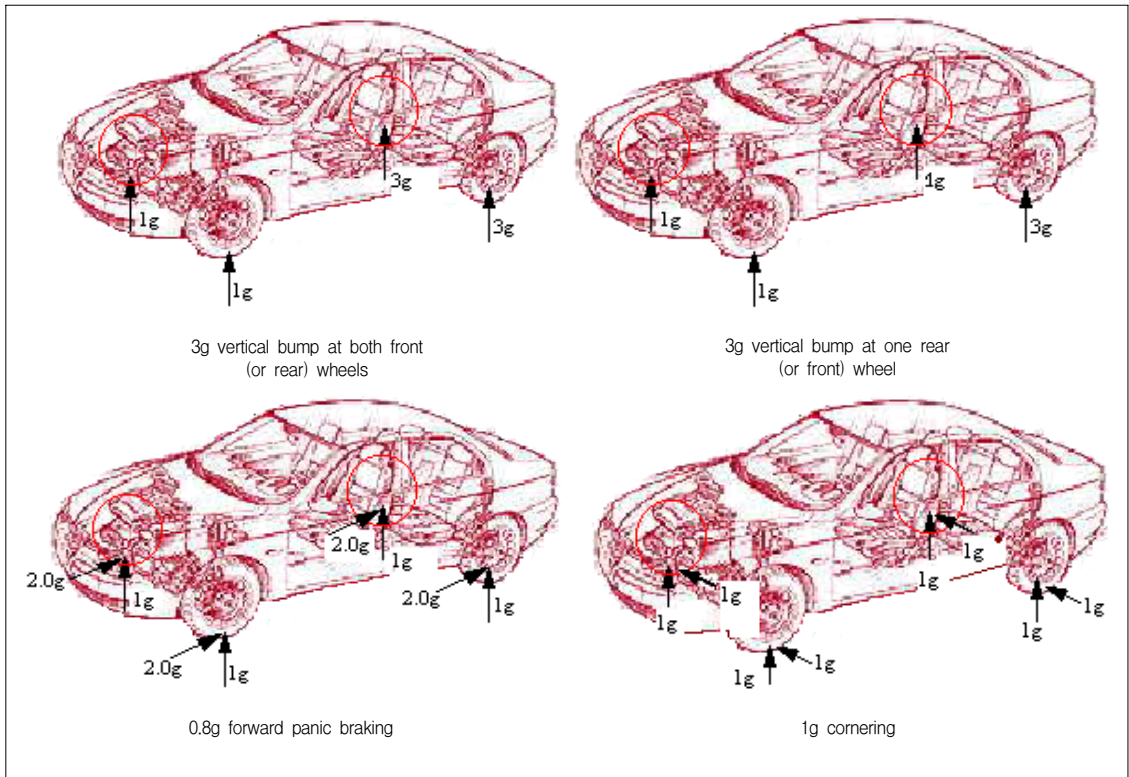
(beam element)로 모델링하고, 각 부쉬류 및 타이어의 강성특성은 스프링 요소를 이용한다. 타이어 & 휠, 브레이크, 코일 스프링, 속 업소버(shock absorber) 등은 질량과 관성 특성을 구하여 집중 질량 요소로 모델링하며, 너클(knuckle)과 같은 구조 현가부품에 있어서 응력 분포가 요구되지 않는 한 집중 질량 요소로 모델링하며, 결합부위 및 운동에 대한 구속조건은 강체 요소의 다점 구속방정식을 이용하여 기구학적인 특성을 묘사한다. 특히 토션 빔 액슬과 같은 구조 현가계(structural suspension) 시스템인 경우, 쉘 요소로써 모델링한다.

차체에 전달되는 하중을 효율적으로 구조 부재로 분산시킨다는 측면에서 각 부재가 연결되는 결합부 뿐만 아니라 부재로써 마운팅 부위에 대한 설계가 중요하다. 특히 샤시 부품으로부터 전달되는 하중은 이러한 마운팅 부위를 통하여 차체의 구조 부재로 전달되기 때문에 마운팅 부위는 1 차적인 하중 지지부라고 하여도 과언이 아니다. 연결 부위에서 발생할 수 있는 국부적인 변형은 그 부위에서 응력 분포를 변형시키므로 국부적인 강성의 불연속을 유발시켜 하중 분산 경로에 불리하게 작용될 수

있다. 따라서 이러한 국부적인 응력 분포와 변형을 검토하기 위하여 구성 부품의 연결부와 용접부에서 유한 요소 모델링이 중요하다.

차체 구조상 발생하는 국부적인 결합 중, 90%가 이러한 연결부에서 시작되기 때문에, 결합부 강성 및 하중 지지부의 마운팅 강성을 가지지 못하면 하중 경로가 적절하게 전달되지 못하여 국부적인 응력 분포와 변형을 가지게 된다. 국부적인 응력 분포와 변형은 차체의 전체적인 구조적 변형양상에 영향을 준다. 실제적인 차륜을 통하여 차체에 작용하는 하중은 거동 조건에 따라 전 및 후륜에 작용하는 축중 하중(axle load)에 대한 각 차륜별 가중치를 Figure 2에 나타내었으며, 이 조건은 극한 하중조건에 대한 전체적인 구조적 변형 및 응력 분포양상을 검토하기 위한 것이다.

대표적인 차량의 주행 상태는 크게 전륜 또는 후륜의 작용 하중에 기인하는 차체의 굽힘 거동(3g vertical bump at both wheels), 전륜 또는 후륜에서 한쪽 차륜의 작용 하중에 의한 비틀림 거동(3g vertical bump at one wheel), 제동 상태에서 차체의 굽힘 거동(0.8g forward



[Fig. 2] Service loads for body durability analysis

panic braking), 그리고 코너링에 의한 거동(1g cornering)으로 분류할 수 있다. 차체 전체적인 하중 분포양상을 검토하기 위한 경계 조건으로는 주행 중 승객의 위치인 hip point에서 작용되는 가속도에 의한 관성력으로 볼 수 있다. 즉, 평탄로를 주행 중인 차량에 둔턱이나 코너링시 발생하는 하중으로써 임팩트가 작용할 때, 순간적인 차량의 거동은 승객에 가해지는 중력 가속도에 대하여 외력으로 작용하여 차체와 승객은 상하 및 전후 방향으로 거동을 하게 된다.

3.1 관성 경감법

차체에 대한 응력 해석은 표준 범프나 제동시 발생하는 하중을 현가계 기구해석으로부터 계산하여 차체와 사시 부품의 연결부에 전달되는 하중을 구하여 차체 연결부에 직접 작용하여 구조물의 응력 분포를 검토하거나 또는 관성 경감(inertia relief)해석을 통하여 차체를 구성하는 질량체들의 관성 효과(inertia effect)인 구조물의 동적 하중에 대한 응답 특성을 고려하여 응력 분포를 검토한다.

관성 경감법은 PG를 달리고 있는 자동차와 같이 구속되지 않은 구조물(예, 항공기나 우주선등)을 정적으로 해석할 때 사용하는 방법이다. 이는 구속되지 않은 구조물에 작용하는 하중을 정적 평형 상태에서 분리하면 실질적인 작용 하중인 동적 하중과 그에 대한 구조물의 응답인 가속도로 표현되는 관성력이다. 강체 운동에 대하여 각 절점의 작용 가속도에 의하여 운동에 대한 저항력인 관성력이 계산되고 차량의 주행 하중에 중첩되어 정적 평형 상태가 이루어진다. 이와 같은 형태로 구조물은 구속되고 정적 해석이 가능해진다. 이를 수학적으로 설명하면 다음과 같다. 구조물의 절점에서 발생하는 변위는 강체 운동(rigid body motion, 첨자 r)과 유연 운동(flexible motion, 첨자 f)을 하는 자유도로 분리하여 운동 방정식을 나타내면

$$\begin{bmatrix} M_{ff} & M_{fr} \\ M_{fr} & M_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fr} \\ K_{fr} & K_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f \\ P_r \end{Bmatrix} \quad (1-a)$$

$$M \ddot{\delta} + K \delta = P \quad (1-b)$$

이며, 여기서 M 은 관성 행렬(질량 및 관성모멘트), K

는 강성 행렬, P 는 작용 외력을 나타낸다. 식 (1)에서 δ_f 는 δ_r 에 대하여 유연 변형을 가진다. 그리고 구조물의 강체 운동을 고려하면, 외력과 관성력(강체에 대해서면 작용, $P_f=0$)은 정적인 평형을 이루는 점을 감안하면 구조물에 대한 관성력 항과 외력을 동시에 무시할 수 있으며, 유연 변위(δ_f)와 강체 변위(δ_r)사이의 관계와 구조물의 전체 좌표 (δ)와의 관계는

$$\delta_f = - K_{ff}^{-1} K_{fr} \delta_r \quad (2-a)$$

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} - & K_{ff}^{-1} K_{fr} \\ & I \end{bmatrix} \{\delta_r\} = T \{\delta_r\} \quad (2-b)$$

이다. 식 (2-b)을 식 (1-b)에 대입하여 강체에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T^T M T \ddot{\delta}_r + T^T K T \delta_r &= T^T P \\ M_{rr}^* \ddot{\delta}_r + K_{rr}^* \delta_r &= P_r^* \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} M_{rr}^* &= M_{rr} - K_{fr}^T K_{ff}^{-1} M_{fr} \\ &\quad - M_{fr}^T K_{ff}^{-1} K_{fr} + \\ &\quad K_{fr}^T K_{ff}^{-1} M_{ff} K_{ff}^{-1} K_{fr} \\ K_{rr}^* &= K_{rr} - K_{fr}^T K_{ff}^{-1} K_{fr}, \\ P_r^* &= P_r - K_{fr}^T K_{ff}^{-1} P_f \end{aligned}$$

만약 강체 운동에 대하여 구조물이 구속되어 있고, 정정(statically determinate)상태에서 강체 강성 행렬인

K_{rr}^* 은 영 행렬(null matrix)가 된다. 이는 강체 구조물이 정정 상태에서 하중에 대하여 강체를 구성하는 절점의 변위사이에서 유연 변형으로써 유지되지 않는다(강체 운동). 그러므로 식 (3)은 다음과 같다.

$$M_{rr}^* \ddot{\delta}_r = P_r^* \quad (4)$$

식 (2)를 이용하여 식 (4)로부터 유연 변위에 대한 관

성력을 구할 수 있다. 그러므로 식(1-a)로부터 유연 변위에 대한 관성력이 고려된 정적 강성 방정식이

$$K_{ff}\delta_f = P_f + P_f^I \quad (5)$$

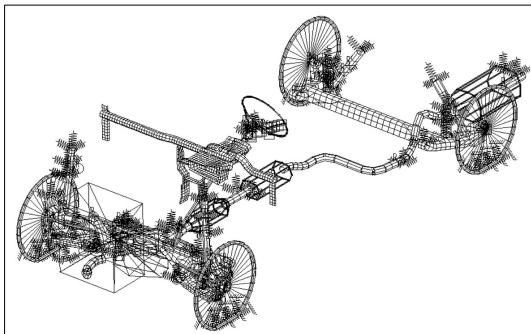
로 구해진다. 여기서 식 (4)를 사용하여 식 (2-a)를 2 차 도함수를 구하여 $\ddot{\delta}_f$ 를 구하여 유연체에 대한 관성력을

$$\text{구할 수 있으며, } P^I = \begin{bmatrix} P_f^I \\ P_r^I \end{bmatrix} = -M \begin{bmatrix} \ddot{\delta}_f \\ \ddot{\delta}_r \end{bmatrix}$$

이며, M 은 전체 구조물의 질량이다.

3.2 차시 시스템에 대한 유한 요소 모델링

차체의 강도 해석을 위하여 현가계에 대한 유한 요소 모델링 방법은 다음과 같다. 링크 시스템은 빔 요소로 모델링하고, 부쉬류 및 타이어의 강성 특성은 스프링 요소를 사용한다. 타이어 & 휠, 브레이크와 일부 부품은 질량과 관성 특성을 고려하여 집중 질량 요소로, 그리고 코일 스프링과 속 업소버는 선형 강성 스프링 요소와 등가 감쇠 강성(equivalent damping stiffness)으로 모델링한다. 스티어링 시스템(steering system) 모델은 휠 요소, 강체 요소, 스프링 요소, 집중 질량 요소, 빔 요소등 다양한 요소로 구성된다. 차량에 결합하기 위하여, 스티어링 샤프트 엔드 노드(steering shaft end node)의 국부 좌표계는 차량 좌표계와 일치시켜야 한다. 또한 샤프트 엔드 노드는 인터미디어트 컬럼(intermediate column)에 스프링 요소로 연결된다. 차체와 연결되는 마운트 브라켓과 타이 바(tie bar)의 끝단은 강체 요소로 연결된다.



[Fig. 3] Chassis platform

코일 스프링의 모델링은 spring upper & lower hard point 위치에서 스프링의 축방향으로 국부 z 방향으로 선정하여 선형 스프링 요소를 사용한다. 속 업소버는 damper upper & lower hard point 위치에서 댐퍼방향을 국부 z 축 방향으로 선정하고 최대 감쇠 계수(damping coefficient)에 대한 등가 감쇠 강성을 계산하여 선형 강성 스프링 요소로 등가한다. 이는 현가 장치의 운동을 실제 거동에 가깝게하기 위한 것이다. Strut upper & lower 절점에 대하여 실제 단면 크기의 빔 요소로 연결한 후, beam end release방법을 사용하여 실린더 조인트(cylindrical joint)의 자유도에 맞게 자유도를 풀고 구속한다. 부쉬는 시험을 통하여 구해진 선형 강성값을 연결부의 두 절점사이에서 선형 강성 스프링 요소로 연결한다. 부쉬에 의하여 부계와 차체가 연결되는 부쉬는 하중이 전반적으로 잘 분포될 수 있도록 빔 요소를 이용하여 실제 연결되는 부위의 절점 전체에 걸쳐서 연결한다. 해석 결과 확인시 시스템의 움직임이 너무 클 경우, 부쉬 강성값을 1.5 ~ 2.0 배로 조정할 수 있다. 가혹한 하중 조건에서 부쉬는 비선형 값을 가지므로 정확한 선형 강성값이라 할 수 없다.

하중의 직접적인 작용에 의한 부품의 변형을 통하여 현가의 거동 특성에 영향을 주는 너클, 트레일링 암, 그리고 토션 빔과 같은 구조 부품은 고체 요소나 쉘 요소를 이용하여 모델을 구성한다. 기구학적인 운동과 관련된 조인트의 경우, 선형 해석에서 거동에 대한 평가를 유효하게 하기 위하여 실제 시스템의 운동 자유도와 같은 형태로 모델링한다. 쉘 요소나 고체 요소로 모델링할 경우, 조인트가 표현되어야 할 절점에서 운동 방향을 설정하는 국부 좌표계를 만든다. 조인트를 표현할 두 절점을 국부 좌표계에 종속시키며, 강체 요소를 사용하여 조인트 거동에 맞게 자유도를 구속시킨다. 빔 요소로 모델링할 경우, 조인트가 표현되는 빔 요소의 절점에 beam end release방법을 이용하여 조인트 거동에 맞도록 한 절점에 대하여 변위 자유도를 release시킨다. 차체뿐만 아니라 현가계에 대한 강도 해석에 사용될 수 있는 차시 시스템에 대한 유한 요소 모델링이 Figure 3에 나타나있다.

① Front suspension & steering system model

FF Type의 승용차의 경우, McPherson strut type이 주로 쓰이며, front suspension system은 크게 타이어, 너클, 속 업소버, 코일 스프링, 로어 컨트롤 암(lower

control arm), 롤 안정바(stabilizer bar), 타이 로드(tie rod), 스티어링 기어 링크 시스템(steering gear linkage system)으로 구성되며, 빔 요소, 스프링 요소, 집중 질량 요소, 강체 요소를 이용하여 시스템을 구성한다. 스티어링 시스템은 랙과 피니언, 인터미디에트 샤프트, 스티어링 컬럼, 스티어링 휠, 타이 바(tie bar)로 구성되며, 랙 & 피니언 기어의 경우 다점 구속을 이용하여 회전 운동이 직선으로 전달되는 기구학적 운동을 표현한다. 모델링에는 쉘 요소, 빔 요소, 강체 요소, 스프링 요소등 다양한 종류의 유한 요소가 필요하다. 스티어링 샤프트 및 휠 림(steering shaft and wheel rim), 휠 스포크(wheel spoke) 등은 단면의 형상이 고려된 빔 요소로 구성하며, 타이 바 및 각종 차체 결합용 브라켓들은 쉘 요소로 모델링 한다. Steering upper의 jacket과 shaft사이의 베어링, 휠과 샤프트 사이의 결합 부분, 샤프트의 끝단은 시험치를 근거로 튜닝된 스프링 요소를 사용하여 모델링한다. 타이어와 휠은 실제 차량에 가깝게 시뮬레이션하기 위하여 타이어 중심에 타이어의 집중 질량과 관성 모멘트를 함께 고려한다. 또한 타이어 중심에 디스크 브레이크, 베어링 어셈블리, 캘리퍼 어셈블리에 대한 무게도 고려한다.

② Rear suspension model

Front suspension system 모델링 방법과 동일하다. 즉, 롤 안정바, 액슬, 링크등은 빔 요소로, 코일 스프링, 속 업소버, 타이어 및 모든 마운트 부쉬 등은 스프링 요소로 모델링하고, 링크사이의 조인트 부위는 강체 요소로, 타이어, 코일 스프링, 속 업소버의 질량은 집중 질량 요소로 모델링 한다.

③ Power train & drive line

Power train의 질량 및 관성 제원은 집중 질량 요소로, 엔진 마운트는 스프링 요소를 사용한다. Drive shaft는 빔 요소로 모델링하고 CV joint의 경우는 다점 구속 조건을 이용하여 모델링한다. 엔진과 T/M은 강체 요소로써 블록을 표현하며, 그 무게 중심점에 집중 질량 및 관성 모멘트를 고려한다.

④ Exhaust pipe system

각종 파이프는 빔 요소로 모델링하고, catalytic converter, pre/main silencer등은 강체 요소와 집중 질량 요소로, bellows(flexible coupler), hanger등은 스프링 요

소로 모델링한다.

⑤ Equivalent damping stiffness

자동차가 주행 중 bump와 같은 impact요소를 지나 갈 경우 차륜은 전후/횡/수직방향에서 운동이 발생된다. 이때 발생된 차륜의 운동 에너지는 스프링 및 속 업소버를 통하여 차체로 전달 및 소멸된다. 이런 현가장치의 동적 거동은 다물체 동역학 해석을 이용하여 해를 구해 보면 쉽게 알 수 있다. 그러나 선형 정적해석(linear static analysis)을 이용한 유한 요소 해석을 할 경우에는 속 업소버의 댐핑(N/m/sec) 기능을 표현하기가 난해하다.

선형 정적해석 시 댐핑은 속 업소버의 병진 운동(translation motion)을 억제함으로써 표현하는데 이는 실제 상황과 다소 다른 결과를 나타낸다. 즉, 속 업소버의 병진 운동 억제는 노면에서 발생하는 모든 입력을 차체로 전달시키는 역할을 하게 되므로 스프링의 변형을 무시하게 된다. 따라서 새로운 모델링 기법이 적용될 필요가 있다. 속 업소버의 기능을 묘사할 수 있으며 선형 정적 해석에 적합한 요소를 구성하기 위해서 아래와 같은 가정이 필요하다.

- 속 업소버의 감쇠계수(damping coefficient)는 상수이다. (최대값)
- Impact시 unsprung의 운동 에너지는 1 사이클의 운동으로 소멸된다. 즉 노면과의 impact시 unsprung mass의 운동 에너지 이외의 것은 차체로 전달되어 secondary motion을 발생시킨다.

현가계에 유입되는 에너지의 분배를 고려해 보면, 우선 노면으로부터의 입력 에너지는 unsprung mass의 운동 에너지를 발생시키며 이는 스프링의 탄성 에너지와 댐핑에 의해 소멸되는 에너지(damping energy)로 변환된다. 이 중에서 스프링에 저장되는 에너지는 sprung mass의 운동 에너지에 영향을 끼치게 된다. 아래에 설명할 모델링 기법은 sprung mass의 운동이 일어나지 않는 조건으로 한다. 에너지의 관점에서 unsprung mass에 작용하는 에너지는 damping에 의해 소멸되고 그 외의 것은 ground로 전달된다는 것이다. 상기의 가정으로부터 한 사이클의 댐핑 에너지는 다음과 같다.

○ 1 사이클 당 소멸되는 댐핑 에너지

$$\begin{aligned}
 W_d &= \oint c v dx = \oint c v^2 dt \\
 &= c \omega^2 x^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2(\omega t - \phi) dt \\
 &= \pi c \omega x^2
 \end{aligned}$$

Impact가 발생한 이후의 시스템은 고유 진동수의 주기 운동을 하므로 다음과 같이 변환할 수 있다.(감쇠 고유 진동수 $\omega = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$, ω_n : 비감쇠 고유 진동수)

○ 감쇠 고유 진동수에서 댐핑 에너지

$$W_d = 2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2} \pi k x^2 \quad (\zeta : \text{damping factor, } c/2m\omega_n)$$

댐핑 에너지를 등가 탄성 에너지로 변환하면 다음과 같다.

○ 등가 강성(Equivalent stiffness)

$$\begin{aligned}
 W_d &= W_k \\
 2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2} \pi k x^2 &= \frac{1}{2} K_{eq} x^2 \\
 \therefore K_{eq} &= 4\zeta \sqrt{1 - \zeta^2} \pi k
 \end{aligned}$$

여기서 k 는 스프링 상수.

4. 결론

강도 평가의 목적은 충돌 안전에 요구되는 구조를 제외한 경우, 강도에 기본을 두고 제작된 차체 및 구성 부품이 실제 사용에 있어서 요구되는 내구성을 갖고 있는가, 갖고 있지 않은가를 확인하는 것으로 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 자동차에 대한 강도 기준이 적용된 초기에는 제작하려 하거나 혹은 제작된 자동차가 어느 정도 강도를 갖는가를 판별하는 것이 강도 평가의 주목적이겠지만, 설계 측면에 무게를 두고 보다 적극적으로 강도평가를 할 필요가 있다.
2. 얻어진 평가 데이터를 기준으로 하여 강도 측면에서

부족한 부위를 검토하는 것은 물론 경량화 및 비용 절감을 위하여 강도 측면에서 지나친 부위에 대해서는 필요한 수준까지 그 강도를 내리기 위해서 적극적으로 강도 평가를 수행할 수 있다.

3. 상기 언급된 내용으로 차체의 강도해석을 함에 있어서, 차체뿐만 아니라 하중 및 변형에 대하여 구성 부품 간의 상호 작용을 초기 설계 단계에서 검토해야 올바른 강도 구조개선 효과를 가질 수 있다.

REFERENCES

- [1] J. A. Bannantine, J. J. Comer, & J. L. Handrock, Fundamentals of metal fatigue analysis, Prentice-Hall, 1990.
- [2] M. M. Kamal & J. A. Wolf, Jr. Modern Automotive Structural Analysis, Van Nostrand Reinhold Co., 2012.
- [3] R. R. Craig, Jr., Structural Dynamics: An introduction to computer methods, John Wiley & Sons, 2007.
- [4] M.F. Nelson & J. A. Wolf, Jr. "The use of inertia relief to estimate impact loads", SAE Transactions, Vol.86, Paper No. 770604, pp.2237~2243, 2013.
- [5] Y. S. Byun, J. H. Um, R. G. Jeong, B. H. Kim, S. W. Kang, "Magnetic Markers-based Autonomous Navigation System for a Personal Rapid Transit (PRT) Vehicle", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 13, No. 1, pp. 297-304, 2015.
- [6] J. I. Lee, "The Development of Decelerating Motor of Electronic Power Steering", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 2, No. 2, pp. 27-34, 2011.
- [7] J. B. Ma and J. I. Lee, "Mechanical Characteristic Analysis of Structural Light-Weight Aluminum Foam", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 2, No. 3, pp. 1-6, 2011.
- [8] J. I. Lee, "Production of Window Motor Assembly Parts in Automotive Body", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 3, No. 4, pp. 29-34, 2012.
- [9] J. Y. Kim, "Mathematical Model for Dynamic Performance Analysis of Multi-Wheel Vehicle",

Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 3, No. 4, pp. 35-44, 2012.

[10] J. W. Cho, "Structural Safety Analysis on Crack Propagation Compact Tension Specimen", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 5, No. pp.23-37, 2014.

[11] M. J. Kang and U. Kim, "A Study on Structural Durability due to the Configuration of Ripper at Excavator", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 5, No. 2 pp.13-18, 2014.

[12] G. H. Kim, C. G. Kim, S. M. Chang, H. I. Moon, "Design of Curve Road Detection System by Convergence of Sensor", Journal of digital Convergence, Vol. 14, No. 8, pp. 253-259, 2016.

[13] Y. S. Byun, J. H. Um and B. H. Kim, "Magnetic Makers-based Autonomous Navigation System for a Personal Rapid Transit(PRT) Vehicle", Journal of digital Convergence, Vol. 13, No. 1, pp. 297-304, 2015.

[14] K. M. Cho, "Development of Guide and Facility Management App. by using Augmented Reality QR Code", Journal of digital Convergence, Vol. 12, No. 4, pp. 245-249, 2014.

[15] Y. H. Ahn and J. H. Park, "A Study on Development of Sustainable PLM Framework", Journal of digital Convergence, Vol. 13, No. 3, pp. 65-73, 2015.

[16] M. S. Yoon, C. B. Cho and K. R. Park, "A Design and Implementation of the Temperature Testing Equipment Malfunction Monitoring System using Arduino", Journal of digital Convergence, Vol. 14, No. 5, pp. 317-323, 2016.

[17] H. J. Moon, "Polling Method based on Weight Table for Efficient Monitoring", Journal of Convergency Society for SMB, Vol. 5, No. 4, pp.5-10, 2015.

[18] Y. Z. Li, Y. S. Choi, "Design and Implementation of Wearable Device Using Lithum Ploymer consist of Peltier", Journal of Convergency Society for SMB, Vol. 5, No. 2, pp.15-20, 2015.

저자소개

이 정 익(Jeong-Ick Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 공과대학. 기계공학과(공학사)
- 1993년 2월 : 한양대학교 공과대학. 정밀기계공학과(공학석사)
- 1999년 8월 : 한양대학교 공과대학. 정밀기계공학과(공학박사)

• 1993년 1월 ~ 1999년 12월 : (주)대우전자. 중앙연구소(선입연구원)

• 2000년 3월 ~ 2007년 2월 : 용인송담대. 자동차기계 설계전공(교수)

• 2007년 3월 ~ 현재 : 인하공전. 기계공학부. 기계설계과(교수)

<관심분야> : CAD/CAM/CAE, 생산자동화, 사출금형, IoT & Ubiquitous, 3D PRINTING, BIOMECHANICS